

УДК 539.422.3

**А. Э. Свирид<sup>1,2\*</sup>, Е. С. Белослудцева<sup>1</sup>, А. В. Пушин<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург

\*svirid2491@rambler.ru

## ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДВУХ СИСТЕМ Cu–Ni–Al И Ni–Mn–Fe

Методами просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии (ПЭМ и РЭМ), дифракции электронов и рентгеновских лучей исследована микроструктура сплавов двух систем Cu–Al–Ni и Ni–Mn–Fe, определен фазовый состав всех исследованных сплавов, изучен и проанализирован характер изломов при деформации до разрушения.

*Ключевые слова:* термоупругое мартенситное превращение, длиннопериодная кристаллическая решетка, электронно-микроскопические исследования, фрактография, хрупкость

**A. E. Svirid, E. S. Belosludtseva, A. V. Pushin**

## ELECTRON-MICROSCOPIC STUDY OF SHAPE MEMORY OF SYSTEMS Cu–Ni–Al AND Ni–Mn–Fe ALLOYS

The microstructure of alloys in a wide range of chemical compositions has been studied by transmission and scanning electron microscopy, diffraction of electrons and X-rays. The phase composition of all investigated alloys and the mechanism of the fracture under deformation have been determined.

*Keywords:* thermoelastic martensitic transformation, long-period lattice, electron-microscopic studies, fractography, brittleness

**Н**аиболее острой проблемой, затрудняющей практическое применение многих поликристаллических бинарных и многокомпонентных интерметаллических атомно-упорядоченных сплавов на основе никеля и меди с эффектами памяти формы (ЭПФ), являются их сравнительно низкие прочностные, пластические и усталостные характеристики и склонность к хрупкому разрушению. Так, поликристал-

лические сплавы Cu—Al—Ni испытывают хрупкое интеркристаллитное разрушение уже после деформации на 2–3 %. К основным причинам такого разрушения относят: очень большую упругую анизотропию их метастабильного аустенита; крупные размеры зерен; наличие зерно-границных сегрегаций и выделений охрупчивающих фаз.

В настоящей работе проведено сравнительное исследование сплавов с ТМП и обусловленными ими (ЭПФ) двух систем легирования Cu—Al—Ni (9–14 масс. %) и Ni—Mn—Fe (5–15 ат. %).

Показано, что общей особенностью изучаемых сплавов по данным ПЭМ является мультипакетная морфология попарно двойникованных мартенситных фаз [1–2]. К основным кристаллоструктурным характеристикам пакетной морфологии мартенсита относятся плоские границы первичных попарно двойниково-ориентированных кристаллов и внутренних нанодвойников с кристаллографическими габитусами, близкими  $\{110\}\beta$ , и ориентационные соотношения по типу Бейна. Наблюдаемая морфология мартенсита в целом типична и для мартенсита в монокристаллических сплавах тех же составов. В монокристаллах низкомодульных цветных сплавов с ЭПФ это обстоятельство ответственно за их высокую структурно-фазовую и физико-механическую обратимость при реализации ТМП под влиянием температуры или внешней нагрузки. Однако, как правило, высокая хрупкость данных сплавов в поликристаллическом состоянии исключает практическую реализацию в них эффектов термомеханической памяти и сверхупругости. Исходя из этого установление причин хрупкости и их устранение представляет важную научно-практическую задачу.

Исследование изломов сплавов проводилось с помощью РЭМ во вторичных электронах на образцах после испытаний до разрушения. На рис. 1, а приведено изображение изломов образцов состава  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{45}\text{Fe}_5$  и  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{Fe}_{15}$ . Видно, что разрушение происходит как по транскристаллитному (в основном по границам зерен), так и по интеркристаллитному типу (в основном по стыкам пакетов мартенситных кристаллов внутри зерна). Это зависит от расположения пакетов мартенситных пластин относительно направления распространения трещины разрушения. Если плоскость пакета расположена вдоль трещины, то происходит хрупкое разрушение (рис. 1, а). Такое поведение можно объяснить концентрацией напряжений в определенных областях поликристаллического сплава. А если трещина развивается перпендикулярно или под углом к габитусу мартенситных пластин пакета, то имеет место хрупко-вязкий характер разрушения. При большем

увеличении на поверхности изломов можно наблюдать некоторое количество областей, характеризующихся пластинчатым рельефом.

Характер разрушения при растяжении образцов крупнозернистых сплавов, как правило, являлся межзерненным хрупким, а в более мелкозернистых сплавах он становился вязким (ср. рис. 2 *а, б*) или смешанным вязко-хрупким.

При этом по данным механических испытаний при комнатной температуре изменялись предел прочности  $\sigma_B$ , предел текучести  $\sigma_M$ , относительное удлинение  $\delta$ .

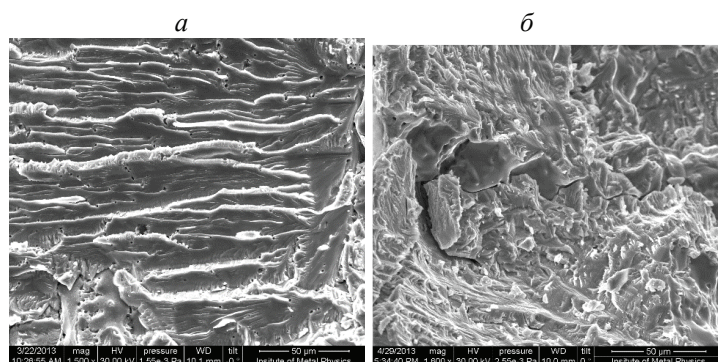


Рис. 1. Фрактография сплавов

*а* —  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{45}\text{Fe}_5$ , *б* —  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{Fe}_{15}$

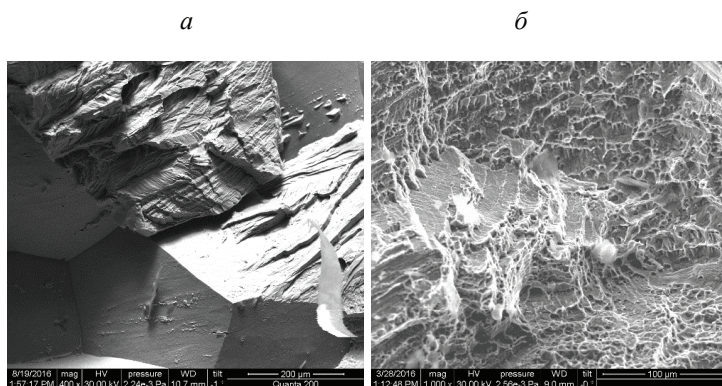


Рис. 2 Фрактография сплавов

*а* —  $\text{Cu-14\%Al-3\%Ni}$ , *б* —  $\text{Cu-9,2\%Al-3\%Ni}$

Повышение механических свойств сплавов было обусловлено измельчением зеренной структуры  $\beta$ -аустенита и пакетной субструктуры.

ры. Так, для мелкозернистых сплавов с 9,2 и 9,5 масс. %Al величина относительного удлинения сохраняется на хорошем уровне ( $>10\%$ ), а для остальных сплавов с содержанием алюминия 10–14 масс. % она не превышает 5 %.

*Работа выполнена в рамках госзадания (шифр «Структура»)  
г.р. № АААА-А18-118020190116–6 и при финансовой поддержке  
гранта РФФИ 18–32–00529 мол\_а.*

### **Литература**

1. Влияние легирования алюминием на структуру, фазовый состав и термоупругие мартенситные превращения в тройных сплавах Ni–Mn–Al / Е. С. Белослудцева [и др.] // ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 9. С. 55–59.
2. Влияние термомеханической обработки на структурно-фазовые превращения в сплаве Cu–14Al–3Ni с эффектом памяти формы, подвергнутом кручению под высоким давлением / А. В. Лукьянов [и др.] // ФММ. 2018. Т. 119, № 4.